

بررسی اثر رزین اپوکسی بر دوام و آسیب چرخه‌های ذوب و یخ در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA) حاوی الیاف سرامیک

محمد مهدی مجیدی‌شاد، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

محمد مهدی خیبری*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

فریدون مقدس‌نژاد، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

[Email: mkhabiri@yazd.ac.ir](mailto:mkhabiri@yazd.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۴ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۲

چکیده

نیاز به اجرای مخلوط‌های آسفالتی با مقاومت و دوام بیشتر، در راستای کاهش هزینه‌های نگهداری، همواره مدنظر محققین بوده است. آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA) از جمله این آسفالت‌ها می‌باشد که به واسطه درصد قیر بهینه بیشتر و ساختار دانه‌بندی خاصش بهره‌گیری از افزودنی‌های پلیمری و الیاف‌های مختلف را مورد توجه قرار داده است. در این پژوهش، ترکیب سه درصد وزنی متفاوت رزین اپوکسی (۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) به‌عنوان یک اصلاح‌کننده پلیمری ترموست به قیر و همچنین حضور الیاف سرامیک (۰/۴ درصد کل وزن مخلوط) جهت ارتقاء عملکرد در برابر اثر مخرب چرخه‌های ذوب و یخ در مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، ابتدا خصوصیات رئولوژی و شیمیایی قیر اصلاح‌شده بررسی شد و سپس آزمایش‌های ریزش قیر آسفالت، کانتابرو و چرخه ذوب و یخ روی نمونه‌ها انجام پذیرفت. تحلیل نتایج نشان‌دهنده تغییرات مثبت در خصوصیات رئولوژی و شیمیایی قیر، متناسب با درصد افزایش رزین اپوکسی بوده، به نحوی که نمونه اصلاح‌شده با ۲۰ درصد رزین اپوکسی کمترین میزان تخریب ناشی از سیکل‌های ذوب و یخ را تجربه نمود. همچنین، مشخص گردید که الیاف سرامیک نقش مؤثرتری نسبت به اصلاح‌کننده پلیمری در کاهش میزان ریزش قیر و افزایش مقاومت آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای در برابر عریان‌شدگی ناشی از ضربه دارد.

واژه‌های کلیدی: رزین اپوکسی، آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA)، چرخه‌های ذوب و یخ، کانتابرو، الیاف سرامیک.

۱. مقدمه

عملکرد و دوام یک روسازی، به واسطه خصوصیات ویسکوالاستوپلاستیک آسفالت همواره تحت تأثیر بار ترافیکی و شرایط دمایی محیط می‌باشد (سول سانچز و همکاران، ۲۰۱۵؛ مجیدی‌شاد و همکاران، ۲۰۲۲). آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای^۱ (SMA) به واسطه ویژگی‌هایی نظیر مقاومت بیشتر در برابر پدیده شیارشدگی، مقاومت لغزندگی بهتر، دوام زیاد، مقاومت در برابر ترک انعکاسی و کاهش سطح آلودگی صوتی، مورد توجه و بهره‌برداری بسیاری از کشورهای اروپایی و ایالت‌های آمریکا جهت اجرا در لایه رویه راه‌های دارای ترافیک سنگین قرار گرفته است (بلازیوسکی، ۲۰۱۶؛ یاراحمدی و همکاران، ۲۰۲۲). مخلوط SMA با دانه‌بندی میان‌تهی، شامل مقدار زیادی مصالح درشت‌دانه جهت پیشینه کردن تماس سنگدانه به سنگدانه و ایجاد شبکه کارای توزیع بار است که در آن مصالح درشت‌دانه به وسیله یک لایه نسبتاً ضخیم قیر به یکدیگر متصل شده‌اند. همین ساختار دانه‌بندی و قیر بیشتر می‌تواند سبب بروز پدیده ریزش قیر در آسفالت SMA گردد که متعاقباً بروز خرابی‌های عملکردی دیگر را به همراه خواهد داشت. لذا، به‌کارگیری افزودنی‌های پلیمری و الیاف در این مخلوط‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است.

به طور کلی، می‌توان پلیمرها را بر اساس رفتار تحت حرارت به سه دسته الاستومر، ترموپلاستیک و ترموست تقسیم نمود. رزین اپوکسی از جمله پلیمرهای ترموست مطرح می‌باشد که از دهه ۶۰ میلادی در آسفالت عرشه پل‌های فلزی به‌کار گرفته شده است (لو و همکاران، ۲۰۱۷). طی سالیان اخیر، مطالعات مختلفی در راستای ارتقای قیر اصلاح‌شده با رزین اپوکسی و به‌کارگیری آن در روسازی‌های متنوع‌تر صورت پذیرفته است (ین و همکاران، ۲۰۱۵؛ فوهاید و همکاران، ۲۰۱۸). هنگامی که مولکول‌های تشکیل‌دهنده

رزین ساختار خود را بعد از واکنش شیمیایی پیدا می‌کنند یک شبکه سه‌بعدی در ساختار قیر به‌وجود می‌آید که دامنه حرکت بخش آسفالتیک قیر را محدود می‌سازد (آپستولیدیس و همکاران، ۲۰۱۸). تحت این شرایط، پدیده ترموست شدن قیر سبب مقاومت بیشتر در برابر پیری و صدمات شیمیایی می‌شود (وو و همکاران، ۲۰۱۹). به واسطه عملکرد متفاوت آسفالت‌های اپوکسی، این نوع از مخلوط‌ها اکنون نه تنها در عرشه پل‌های فلزی بلکه در روسازی‌های متخلخل با دوام بالا، روسازی تقاطعات با بار ترافیکی سنگین و همچنین روسازی راه و تونل‌ها به‌کار گرفته می‌شوند (کیان و لو، ۲۰۱۵).

مطالعات انجام شده در مورد تأثیر رزین اپوکسی بر عملکرد مخلوط آسفالتی نسبتاً محدود بوده و غالباً بعد شیمی آن مطرح بوده است. در پژوهشی تحت عنوان "بررسی آزمایشگاهی خواص قیرهای اصلاح‌شده با رزین اپوکسی" مقادیر وزنی قیر ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نسبت بهینه زمان عمل‌آوری در رزین اپوکسی اثر زیادی بر نقطه نرمی قیر اصلاح‌شده دارد، به طوری که با افزایش زمان عمل‌آوری از صفر تا ۶۰ دقیقه، میزان نقطه نرمی همه نمونه‌ها ۱۰ تا ۵۰ درصد افزایش یافت (یو و همکاران، ۲۰۰۹).

مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۱ توسط وانگ و همکاران جهت ارزیابی و گسترش امکان استفاده از رزین اپوکسی بیس‌فنول A هیدروژنه (AL-3040) صورت پذیرفت. در این مطالعه، بهره‌گیری از هاردنر پلی‌آمیدی ۶۵۰ و سفت‌کننده A، مخلوط آسفالتی با کارپذیری مناسب را به همراه داشت، به نحوی که مخلوط حاصل پایداری دمایی زیاد، مقاومت ترک‌خوردگی در دمای کم و حساسیت در برابر آب بهتری را در قیاس با نمونه‌های استاندارد معمول از خود نشان داد. اگرچه ویسکوزیته بیشتر قیرهای اصلاح‌شده با رزین اپوکسی ممکن

^۱- Stone Matrix Asphalt

کم مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تست خمش نیم‌دایره به- علاوه تحلیل انرژی آزاد سطحی نمونه‌های حاوی افزودنی الیاف سرامیک به مقدار ۰/۴ وزنی قیر مثبت ارزیابی گردید. بدین نحو که حداکثر بار قابل تحمل، انرژی شکست و همچنین چقرمگی در دمای کم افزایش پیدا نمود.

ونگ و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه خود جهت ارتقاء خصوصیات مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده، به بررسی اثر توأم رزین اپوکسی و الیاف شیشه پرداختند. عملکرد قیر اصلاح‌شده با ترکیب درصدهای مختلف (صفر، ۳، ۶، ۹ و ۱۲) و انواع متفاوت الیاف شیشه توسط تست ویسکوزیته قیر و چندین تست عملکردی دیگر ارزیابی شد. نتایج حاکی از آن بود که نوع و مقدار مناسب الیاف می‌تواند ویسکوزیته را افزایش داده و مقاومت کششی را بهبود بخشد. از سوی دیگر، زمان ساخت مجاز کاهش یافت. به‌علاوه، تأثیر الیاف شیشه بر نفوذپذیری، اصطکاک و پایداری در دمای زیاد ناچیز بود. اما بهره‌گیری از الیاف شیشه تأثیر زیادی بر افزایش مقاومت در برابر عریان‌شدگی و حساسیت رطوبتی FEAC داشت. با تغییر مقدار الیاف از صفر تا ۶٪، دامنه کرنش انعطاف‌پذیر در دمای ۲۰ درجه سلسیوس ۵۰/۸ درصد افزایش یافت. این مشخص می‌سازد که افزودن الیاف شیشه به طرز چشم‌گیری مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دمای کم مخلوط FEAC را افزایش می‌دهد.

روسازی آسفالت طی عمر خدمت‌دهی خود چرخه‌های مختلف یخبندان و ذوب را تجربه می‌کند که طی آن نفوذ آب در هنگام یخ زدن باعث ایجاد یخ‌زدگی در ریزترک‌های موجود می‌شود و تکرار این چرخه به بروز ریزترک‌های جدید ختم می‌گردد. این چرخه‌ها آسیب قابل توجهی به قسمت ماستیک و نهایتاً عملکرد ویسکوالاستیک روسازی وارد می‌آورند (آزگان و سرین، ۲۰۱۳).

مطالعه چنگ و همکاران (۲۰۱۸) جهت ارتقاء مقاومت آسفالت (AC-13) به کمک الیاف بازالت در برابر خرابی

است در زمان اجرا محدودیت‌هایی را به‌وجود آورد اما تحقیقات نشان داده که ویژگی‌های قیر اصلاح‌شده با رزین اپوکسی بسیار به نوع، مقدار ماده شیمیایی پایه، ماده عمل‌آورنده، دما، رطوبت، نحوه اختلاط رزین با قیر و همچنین خصوصیات پایه‌ای قیر وابسته است (شیانگ و شیائو، ۲۰۲۰؛ بهمنی و همکاران، ۲۰۲۲).

زنه‌گ و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی نوآورانه روی قیر اصلاح‌شده با ترکیبی از رزین اپوکسی و پلی‌اورتان (EPU) به بررسی مقاومت آن در برابر ترک‌خوردگی روسازی عرشه پل‌های فلزی پرداختند. قیرهای دارای خصوصیات لاستیکی همچون قیرهای اصلاح‌شده با پلی‌اورتان (PU) و رزین اپوکسی (EP) دارای مقاومت، مدول الاستیسیته و چقرمگی بیشتر می‌تواند جهت رفع مشکل ترک‌خوردگی در دمای کم کارا باشد. بعد از انجام آزمایش‌ها روی فرمول‌های مختلف ترکیب رزین اپوکسی و پلی‌اورتان نهایتاً نمونه بهینه حاوی ۸ درصد PU و ۳۲ درصد EP بهترین عملکرد مکانیکی، انعطاف‌پذیری و قابلیت نگهداری را داشت. تصاویر آزمایش طیف‌سنجی مادون قرمز از نمونه قیرهای اصلاح‌شده نشان داد که نفوذ PU به درون ساختار شبکه سه‌بعدی EP نقش مثبتی در افزایش انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر دما دارد. رشد ویسکوزیته قیر اصلاح‌شده به مقدار زیادی تحت تأثیر دمای اختلاط و درصد ترکیب مواد افزودنی می‌باشد.

از سه دسته الیاف سلولزی، پلی‌استری و معدنی به منظور ارتقاء خصوصیات ویسکوالاستیک آسفالت و کاهش ریزش قیر بهره برده می‌شود. عربانی و شعبانی (۲۰۱۹) با بررسی تأثیر الیاف سرامیک بر قیر اصلاح‌شده و مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته نشان دادند که این الیاف باعث بهبود خصوصیات دینامیک نظیر مقاومت در برابر شیارشدگی و عمر خستگی می‌شود. در مطالعه ناصری و همکاران (۲۰۲۰) نقش الیاف سرامیک به عنوان یک اصلاح‌کننده قیر جهت بهبود عملکرد آسفالت گرم در برابر ترک‌خوردگی در دمای

نظیر خمش نیم‌دایره (SCB^۲)، کشش مستقیم نمونه‌های دیسکی (DCT^۳)، خستگی تیرچه خمشی (BBF^۴)، تست رویه به روش تگزاس (TXOT^۵) و تست تنش غیرمستقیم به روش سوپریو (SIDT^۶) اشاره نمود. این تست‌ها نشان داده‌اند که قابلیت ارائه نتایج ارزشمند از عملکرد آسفالت را دارند. اما از طرفی، هزینه‌بر و زمان‌بر بوده، به‌علاوه دارای پیچیدگی در تنظیمات لازم تست می‌باشند. تست کاهش وزن کانتابرو (CML^۷) به‌عنوان یک تست اقتصادی و ساده توانسته نتایج قابل تأییدی در راستای ارزیابی دوام و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی ارائه نماید (کاکس و همکاران، ۲۰۱۷). تست کانتابرو به دلیل کارایی سهل‌تر در قیاس با تست‌های دارای لجستیک پیچیده، گزینه‌ای مناسب برای ارزیابی مخلوط‌های آسفالتی خاص است.

بررسی مطالعات صورت گرفته روی آسفالت SMA و اهمیت تولید و اجرای راه‌های با دوام و صرفه اقتصادی بیشتر، لزوم افزایش شناخت اثر مواد افزودنی جدید در این آسفالت را امری مهم ساخته است. از این‌رو، هدف این مطالعه بررسی آزمایشگاهی تأثیر ترکیب سه درصد مختلف (۱۰، ۱۵ و ۲۰) رزین اپوکسی در قیر و همچنین افزودن الیاف معدنی سرامیک به مقدار ۰/۴ درصد وزنی مخلوط آسفالت SMA به روش اختلاط خشک می‌باشد. برای دستیابی به هدف مد نظر، در گام نخست، تأثیر میزان و نحوه ترکیب رزین اپوکسی بر خصوصیات رئولوژی و شیمیایی قیر به کمک تست‌های مرسوم قیر، رئومتر برشی دینامیکی (DSR^۸) و آزمون طیف‌سنجی تبدیل فوری مادون قرمز (FT-IR^۹) مطالعه شد و سپس تست‌های محاسبه قیر بهینه، ریزش قیر آسفالت، کاهش وزن کانتابرو، حساسیت رطوبتی چرخه‌های ذوب و یخ به عنوان شبیه‌سازی جهت ارزیابی دوام و عملکرد

دوره‌های یخبندان انجام گرفت. الیاف معدنی بازالت دوست- دار محیط‌زیست به‌کار رفته در این پژوهش به طول ۶ میلی‌متر و مقدار معادل ۰/۴ درصد وزنی مخلوط آسفالتی سبب افزایش مدول سفتی و همچنین مقاومت در برابر شکست نمونه‌ها شد و مهمتر از این، تأثیر مشهودی در کاهش نرخ تخریب به ازای سیکل‌های بیشتر یخبندان گذاشت. یان و همکاران (۲۰۱۵) مطالعه‌ای روی میزان مقاومت آسفالت SMA در برابر چرخه‌های ذوب و یخ انجام دادند. در این پژوهش، نمونه‌های حاوی درصد فضاهای خالی اولیه متفاوت (۲/۵ تا ۶ درصد) و همچنین دو نوع فیلر آهکی و سیمان تحت ۱ تا ۲۰ چرخه ذوب و یخ مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج حاکی از اهمیت پررنگ نسبت درصد فضای خالی اولیه و عملکرد بهتر فیلر آهکی در چرخه‌های بالاتر بود.

تست چرخه ذوب و یخ آسفالت در اساس مشابه تست حساسیت رطوبتی می‌باشد. خرابی رطوبتی نتیجه بروز پدیده از بین رفتن چسبندگی بین قیر و سنگدانه و یا از بین رفتن پیوستگی بین سنگدانه‌ها در مخلوط آسفالتی است. پژوهش‌های بسیاری در زمینه بهبود مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت انجام شده که بخشی از آنها به استفاده از سنگدانه‌های با مقاومت رطوبتی زیاد و بخش دیگر بر استفاده از قیرهای با کیفیت، اصلاح خصوصیات قیرها به کمک انواع افزودنی‌ها متمرکز گردیده است (بهنود و اولک، ۲۰۱۷).

تست‌های آزمایشگاهی که بتوانند دوام و مقاومت مخلوط‌های آسفالتی را در برابر ترک خوردگی ارزیابی کنند نیازی اساسی در ارزیابی آسفالت می‌باشند. از جمله تست‌های مطرح و پیشرفته در این باب می‌توان به تست‌هایی

۶- SuperPave indirect tension

۷- Cantabro mass loss

۸- Dynamic shear rheometer

۹- Fourier Transform Infrared spectrometer

۲- Semicircular bend

۳- Disc-shaped compact tension

۴- Bending beam fatigue

۵- Texas overlay

بلندمدت نمونه‌های آسفالت SMA اصلاح شده در قیاس با نمونه‌های شاهد صورت گرفت.

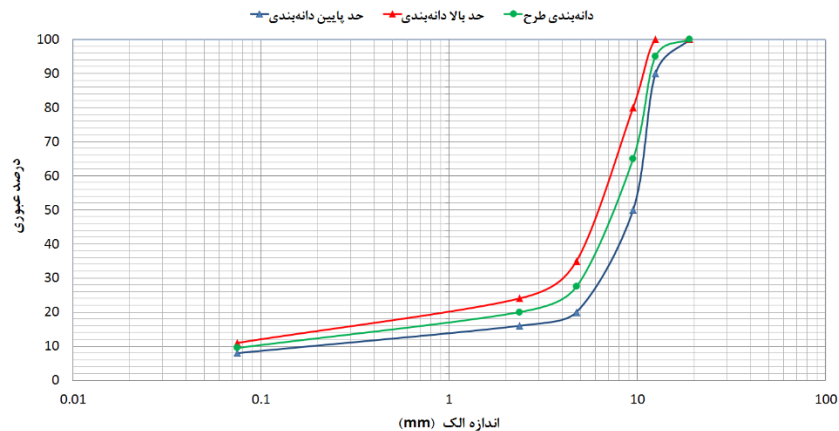
۲-۲. سنگدانه

در این پژوهش، از سنگدانه‌های شکسته شده آهکی معدن کارخانه آسفالت فرش راه واقع در یزد، جهت ساخت مخلوط های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای استفاده شده است. دانه‌بندی از نکات مهم در طراحی مخلوط آسفالتی است. آسفالت SMA یک نوع آسفالت رویه با دانه‌بندی میان‌تهی است که از مصالح ۱۰۰ درصد شکسته تهیه می‌شود. برای ساخت نمونه‌ها در این پژوهش از حد وسط دانه‌بندی آسفالت SMA با حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۲۰ میلی‌متر، ارائه شده در نشریه ۲۳۴ آیین‌نامه طرح روسازی آسفالتی راه‌های ایران استفاده شد. حدود دانه‌بندی انتخابی به همراه مشخصات فنی مصالح مصرفی بر اساس نشریه ۲۳۴ به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه گردیده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱. قیر

قیر مورد استفاده در این پروژه، قیر پالایشگاه نفت جی اصفهان با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ (PG64-22) است. از جمله عوامل مهم در انتخاب نوع قیر برای یک پروژه می‌توان به مواردی نظیر نوع دانه‌بندی مصالح سنگی، شرایط جوی محل اجرای طرح، ترافیک عبوری و ضخامت آسفالت اشاره نمود. مشخصات فیزیکی قیر عبارت است از: چگالی (۲۵ °C) ۱/۰۲، درجه نفوذ (۱۰/۶۵ mm)، نقطه نرمی (۵۰ °C) - شکل - پذیری (۱۵۵ cm) و درجه اشتعال (۳۲۴ °C).



شکل ۱. دانه‌بندی منتخب مصالح سنگی

جدول ۱. مشخصات فنی مصالح سنگی درشت‌دانه

نتایج آزمایش	حدود استاندارد	روش آزمایش		آزمایش
		ASTM	AASHTO	
۲۰٫۵	حداکثر ۳۰	C131	T96	درصد سایش به روش لس آنجلس
۱۰۰	حداقل ۱۰۰	D5821	-	درصد شکستگی در یک وجه
۹۹	حداقل ۹۰	D5821	-	درصد شکستگی در دو وجه
۲	حداکثر ۵	D4791	-	درصد سنگدانه‌های پهن و دراز

۲-۳. رزین اپوکسی

مقاومت زیاد در برابر سایش، استحکام مکانیکی خوب، مقاومت شیمیایی و محیطی عالی، تغییرات حجمی کم در هنگام پخت، ثبات ابعادی عالی، مقاومت دمایی زیاد، عایق الکتریکی خوب، مقاومت در برابر اسید و چسبندگی عالی به سطوح مختلف اشاره کرد. مشخصات فنی رزین اپوکسی در جدول ۲ ارائه شده است. نسبت ترکیب این رزین اپوکسی با هاردنر (عمل‌آورنده) پلی‌آمینی ۲ به ۱ می‌باشد.

رزین اپوکسی مورد مطالعه در این پژوهش، رزین اپوکسی E06 SPL پتروشیمی خوزستان، به‌دست آمده از واکنش بیس فنول A و اپی‌کلروهیدرین است. نام شناخته شده این رزین اپوکسی در بین دسته‌بندی‌های مختلف از انواع رزین اپوکسی، رزین اپوکسی دی‌گلیسیدیل‌اتر بیس فنول A می‌باشد. از ویژگی‌های رزین اپوکسی E06 می‌توان به

جدول ۲. مشخصات فنی رزین اپوکسی

ظاهر	ویسکوزیته	درصد اجزای	وزن معادل	میزان گروه‌های
		غیر فرار	اپوکسی	اپوکسی
		(%wt)	(g/eq)	(mol/100g)
واحد	cP	>۹۹,۳	۱۸۵ - ۱۹۲	۰,۵۲ - ۰,۵۴
مقدار	۱۴۰۰۰-۱۰۰۰۰			
	-			
	مایع شفاف			

مشخصات فنی هاردنر پلی‌آمینی در جدول ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۳. مشخصات فنی هاردنر

ظاهر	ویسکوزیته	فرصت کاربری	چگالی	وزن معادل
		فرصت کاربری	چگالی	وزن معادل
		min	g/ml	g/eq
واحد	cP	۲۰-۲۵	۱/۰۲	۹۴
مقدار	۲۰۰-۲۵۰			
	-			
	مایع زرد کم رنگ			

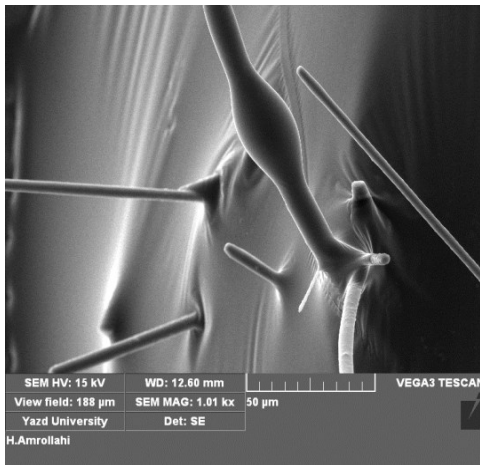


شکل ۲. تصویر رزین اپوکسی و هاردنر به کار رفته در این مطالعه

۲-۴. الیاف

یکی از انواع الیاف‌ها که امروزه به عنوان عایق کاربرد زیادی پیدا نموده، الیاف سرامیک است. الیاف سرامیک در حقیقت فیبرهای سیلیکات آلومینیوم می‌باشند که از ذوب و دمیدن مذاب کائولن با درصد آلومینای زیاد و یا مواد مرسوم‌تری شامل ترکیبی از پودر خالص آلومینا و سیلیس مخلوط شده تشکیل می‌گردد. در این تحقیق، از الیاف سرامیک فله آسیاب-شده شرکت الیاف سرامیک سپید استفاده شده است. شکل ۳، تصویر الیاف سرامیک مصرفی را به صورت فله و همچنین تصویر الیاف سرامیک در قیر، تصویربرداری شده به وسیله میکروسکوپ الکترونی را نشان می‌دهد. این الیاف دارای

طول تقریبی ۲۰ میلی‌متر و قطر ۳-۵ میکرون می‌باشد. وزن کم، قابلیت انعطاف‌پذیری همراه با استحکام کششی زیاد، هدایت حرارتی کم، پایداری حرارتی عالی و پایداری شیمیایی این الیاف آن را به جایگزین مناسبی برای الیاف خطرناک آزبست تبدیل نموده است. با توجه به مواد تشکیل‌دهنده الیاف‌های سرامیک، این الیاف به سه دسته الیاف سرامیک معمول (STD)، الیاف سرامیک حاوی درصد آلومینای زیاد (HA) و الیاف سرامیک حاوی درصد زیرکونیوم (HZ) تقسیم‌بندی می‌شوند. جدول ۴، مشخصات ترکیبات تشکیل‌دهنده الیاف سرامیکی معمول به‌کار رفته در این تحقیق را ارائه می‌کند.



شکل ۳. الیاف سرامیک به‌کار رفته در این مطالعه

جدول ۴. ترکیبات شیمیایی تشکیل‌دهنده الیاف سرامیک مصرفی

$K_2O + Na_2O$	Fe_2O_3	ZrO_2	SiO_2	Al_2O_3
٪۰/۲۵	٪۰/۲	-	٪۵۲	٪۴۷

به مدت یک ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس گرم گشته و پیش از افزوده شدن به قیر به مدت ۴ دقیقه با سرعت ۲۱۰ دور بر دقیقه با یکدیگر به نسبت ۱:۲ مخلوط شدند. سپس به‌وسیله همزن با سرعت ۱۸۰۰ دور بر دقیقه و در دمای اختلاط ۱۶۵-۱۶۰ درجه سلسیوس، ترکیب رزین اپوکسی به

۲-۵. آماده‌سازی نمونه‌های قیر و آسفالت اصلاح‌شده

در این پژوهش، دو نوع قیر پایه و قیر اصلاح‌شده با رزین اپوکسی جهت ساخت نمونه‌های SMA تهیه شد. با توجه به مشاوره شرکت تولیدکننده و ماهیت هاردنر، همچنین مرور مطالعات پیشین، ابتدا رزین اپوکسی و هاردنر به روش بنماری

به منظور مقایسه خصوصیات قیر پایه و قیر اصلاح‌شده با رزین اپوکسی، تست‌های کلاسیک و رئومتر برشی دینامیکی روی نمونه‌ها انجام شد. تست‌های کلاسیک درجه نفوذ، نقطه نرمی، شکل‌پذیری و درجه اشتعال به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM D5، ASTM D36، ASTM D113، ASTM D92 در کنار تست رئومتر برشی بر اساس استاندارد ASTM D7175 به منظور درک بهتر از رفتار رئولوژیک نمونه‌های قیر صورت پذیرفت.

۲-۳. آزمون طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FT-IR)

طیف‌سنجی مادون قرمز جهت تجزیه و تحلیل ساختار مولکولی و ترکیب شیمیایی مواد به کار گرفته می‌شود. این آزمون بر اساس جذب تابش و بررسی جهش‌های ارتعاشی مولکول‌ها و یون‌های چند اتمی صورت می‌گیرد. در این پژوهش، از دستگاه مدل BRUKER برای انجام آزمایش-های FT-IR و تعیین کمیت تغییرات گروه‌های عاملی شیمیایی در مولکول‌های قیر پایه و قیر اصلاح‌شده با رزین اپوکسی بهره گرفته شد.

۳-۳. تست‌های عملکردی

۱-۳-۳. تست ریزش قیر

بر اساس استاندارد AASHTO T305 مقدار ۱۲۰۰ گرم از آسفالت متراکم نشده درون سبد ریزش قیر استاندارد به مدت یک ساعت در اُون جهت اندازه‌گیری مقدار ریزش قیر نگهداری می‌شود. میزان قابل پذیرش قیر ریخته‌شده حداکثر ۰/۳ درصد وزن کل مخلوط آسفالتی است. شکل ۴، سبد استاندارد و یک نمونه ریزش قیر در این پژوهش به ازای دمای اختلاط ۱۶۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد.

آرامی به قیر افزوده گردید (ژو، ۲۰۱۳؛ شو و همکاران، ۲۰۲۰). زمان عمل‌آوری در نظر گرفته شده در دمای محیط (۲۵ درجه سلسیوس) برای سه دسته قیر اصلاح‌شده با ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی رزین اپوکسی، ۸۴ ساعت بوده است. با توجه به ماهیت معدنی الیاف سرامیک و حدود تعریف شده نشریه ۲۳۴، مقداری معادل ۰/۴ درصد وزن کل مخلوط SMA الیاف افزوده شد. با افزودن تدریجی الیاف در مرحله اختلاط قیر و سنگدانه‌ها، مخلوط SMA تهیه شده کاملاً یک-دست و بدون وجود کلوخه‌های الیاف خواهد بود.

نمونه‌های مخلوط آسفالت SMA مطابق با استاندارد AASHTO M325 با اعمال ۵۰ ضربه به دو طرف توسط چکش مارشال و به شکل نمونه‌های استوانه‌ای با ارتفاع ۶۳/۵ و عرض ۱۰۱/۶ میلی‌متر تهیه شدند. بر پایه حدود و روابط وزنی حجمی تعریف شده در آئین‌نامه، مقادیر قیر بهینه برای مخلوط‌های آسفالتی کنترل و اصلاح‌شده با ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ رزین اپوکسی حاوی الیاف سرامیک به ترتیب ۶/۵، ۶/۳، ۶/۲ و ۶/۲ به دست آمد.

لازم به ذکر است که در مطالعات گوناگون، حداکثر مقدار بهره‌گیری از رزین اپوکسی معادل ۴۰ تا ۵۰ درصد وزنی قیر در مخلوط‌های آسفالتی است (هرینگتون، ۲۰۰۹؛ دانگ و لی، ۲۰۱۵). دلایلی نظیر نوع قیر، نوع رزین اپوکسی، پارامتر عملکردی مورد بررسی، هزینه و شیوه تهیه قیر اصلاح‌شده در تعیین میزان به‌کارگیری رزین اپوکسی نقش دارند. در این پژوهش، با توجه به مصرف بیشتر قیر در ساخت آسفالت SMA، ارزیابی قیر اصلاح‌شده با نسبت‌های بهینه‌تر وزنی رزین اپوکسی مدنظر قرار گرفت.

۳. مطالعات آزمایشگاهی

۱-۳. آزمون‌های قیر



شکل ۴. تست ریزش قیر: الف) سبد ریزش قیر و ب) قیر ریخته شده

دمای محیط وزن می‌شوند. سپس، نمونه‌ها در دستگاه سایش لس آنجلس بدون گلوله‌های فلزی قرار داده شده و دستگاه به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۳۰ تا ۳۳ دور بر دقیقه می‌چرخد. نهایتاً درصد کاهش وزن هر نمونه تعیین می‌گردد. شکل ۵، تصویر نمونه سالم قبل و بعد از تست کانتابرو توسط دستگاه لس آنجلس مجموعه دانشگاه یزد را به نمایش می‌گذارد.

۳-۳-۲. تست کانتابرو

آزمایش کانتابرو مطابق با استاندارد AASHTO TP108 به صورت غیرمستقیم نشانگر چسبندگی، پیوستگی و تأثیرات سایش و کنده شدن سنگدانه و قیر در مخلوط‌های آسفالتی است. نمونه‌های استوانه‌ای مارشال قبل از انجام آزمایش در



شکل ۵. تست کانتابرو: الف) نمونه تازه، ب) نمونه درون دستگاه لس آنجلس و ج) نمونه تست شده

منظور شبیه‌سازی مقاومت بلندمدت آسفالت در برابر رطوبت و اثر پدیده یخبندان، نمونه‌های آسفالت با درصد فضای خالی ۷٪ (۶ درصد در آسفالت SMA) ساخته و بعد از اشباع شدن با آب به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۱۸- درجه سلسیوس نگه

۳-۳-۳. تست حساسیت رطوبتی چرخه‌های ذوب و یخ

نمونه‌های مخلوط آسفالت SMA با دو نوع قیر پایه ۶۰/۷۰ و اصلاح شده طبق استاندارد AASHTO T283 تحت آزمایش لاتمن اصلاح شده قرار گرفتند. در این تست، به

که در آن، S_t مقاومت کششی غیرمستقیم (کیلوپاسکال)، P حداکثر بار وارده (نیوتن)، D قطر نمونه (میلی‌متر) و t ارتفاع (میلی‌متر) می‌باشد.

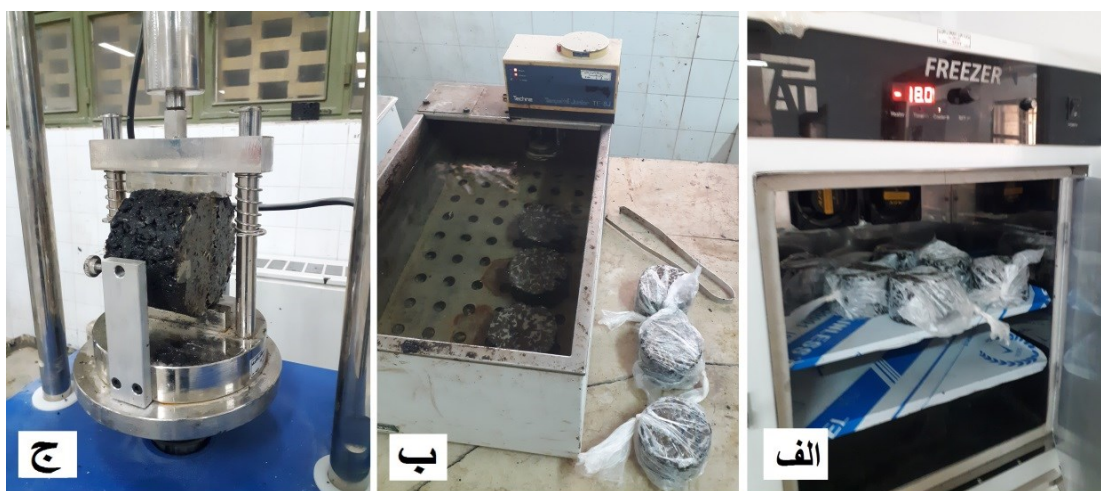
$$TSR = \frac{S_{t,wet}}{S_{t,dry}} \quad (2)$$

که، TSR نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم، $S_{t,wet}$ مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های مرطوب (کیلوپاسکال) و $S_{t,dry}$ مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های خشک (کیلوپاسکال) است.

حساسیت رطوبتی پدیده پیچیده‌ای است که شامل روندهای ترمودینامیک، شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی است. اعمال حداقل پنج چرخه می‌تواند نشانگر تمایز عملکرد نمونه‌های آسفالتی در برابر خرابی ناشی از چرخه ذوب و یخ باشد (کریمی و همکاران، ۲۰۲۱؛ کانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

داشته و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس غرقاب می‌گردند و نهایتاً مقاومت کششی غیرمستقیم ITS^{10} هر دو گروه نمونه‌های شرایط دیده (مرطوب) و شرایط ندیده (خشک) در دمای محیط تست می‌شوند. حداقل مقدار قابل قبول نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم TSR^{11} نمونه‌های شرایط دیده به نمونه‌های شرایط ندیده ۸۰٪ در نظر گرفته می‌شود. پارامتر نسبت مقاومت کششی به ازای تعداد سیکل‌های مختلف ذوب و یخ مبین میزان شدت خرابی رطوبتی آسفالت می‌باشد. به کمک روابط (۱) و (۲) می‌توان ارزیابی کمی از مقاومت نمونه‌های استوانه‌ای مارشال حاصل نمود.

$$S_t = \frac{2000P}{\pi t D} \quad (1)$$



شکل ۶. تست چرخه ذوب و یخ: الف) شرایط یخبندان، ب) شرایط ذوب و ج) نمونه تحت کشش غیرمستقیم

اصلاح‌شده را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، کاهش در مقدار درجه نفوذ و افزایش در نقطه نرمی نمونه‌های اصلاح‌شده مشهود بوده به نحوی که با افزایش رزین اپوکسی از ۱۰ تا ۲۰ درصد، مقدار تغییر در نقطه نرمی ۸ تا ۲۴ درصد می‌باشد. این مورد می‌تواند نشانگر عملکرد مناسب‌تر در دمای زیاد

۴. نتایج و بحث

۴-۱. نتایج آزمایش‌های قیر

جدول ۵، تأثیر افزایش مقدار رزین اپوکسی بر درجه نفوذ، شکل‌پذیری، نقطه نرمی و درجه اشتعال قیر پایه و قیر

¹¹- Tensile Strength Ratio

¹⁰- Indirect Tensile Strength

کاهش در درجه اشتعال نمونه‌های حاوی رزین اپوکسی است. این تغییرات را می‌توان ناشی از ساختار شیمیایی جدید قیر در واکنش با پلیمر ترموست رزین اپوکسی دانست.

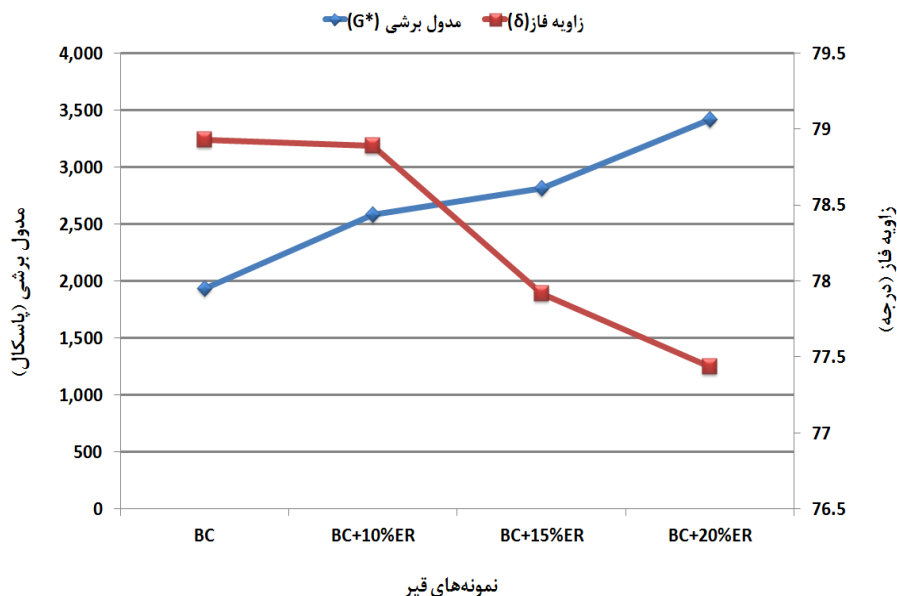
باشد. از سوی دیگر، مقدار شکل‌پذیری نمونه‌های اصلاح‌شده در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، با وجود حد اکثر کاهش ۳۳/۵ درصد، همچنان مقداری بیشتر از ۱۰۰ سانتی‌متر است که نشانگر اصلاح بهینه قیر می‌باشد. نکته قابل توجه، مشاهده

جدول ۵. مشخصات قیرهای اصلاح‌شده با رزین اپوکسی

درجه اشتعال (°C)	شکل‌پذیری @ ۲۵ °C (cm)	نقطه نرمی (°C)	درجه نفوذ @ ۲۵ °C (mm/۱۰)	تست
D92-78	D113-79	D36-76	D5-73	استاندارد ASTM
۳۲۴	۱۵۵	۵۰	۶۵	قیر پایه
۳۱۰	۱۴۴	۵۴	۶۱	قیر + ۱۰ درصد رزین اپوکسی
۳۰۲	۱۳۵	۵۹	۵۷	قیر + ۱۵ درصد رزین اپوکسی
۲۹۸	۱۰۳	۶۲	۵۱	قیر + ۲۰ درصد رزین اپوکسی

تعیین خواص رئولوژی و محاسبه پارامترهای مدول برشی* G و زاویه فاز δ انجام می‌شود. در شکل ۷، نتایج تست رئومتر برشی روی نمونه‌های قیر پایه و اصلاح‌شده در دمای ۶۴ درجه سلسیوس و تحت فرکانس بارگذاری ۱۰ رادیان بر ثانیه نشان داده شده است.

آزمون‌های کلاسیک مانند درجه نفوذ، نقطه نرمی و آزمون‌های دیگر، با وجود ارائه نتایج ارزشمند، به دلیل آنکه نمی‌توانند پاسخ‌های وابسته به زمان قیر را بررسی کنند اطلاعات کاملی را در باره ویژگی‌های رئولوژیک قیر در اختیار قرار نمی‌دهند. آزمون رئومتر برشی دینامیکی برای



شکل ۷. خروجی تست رئومتر برشی قیر در دمای ۶۴ درجه سلسیوس

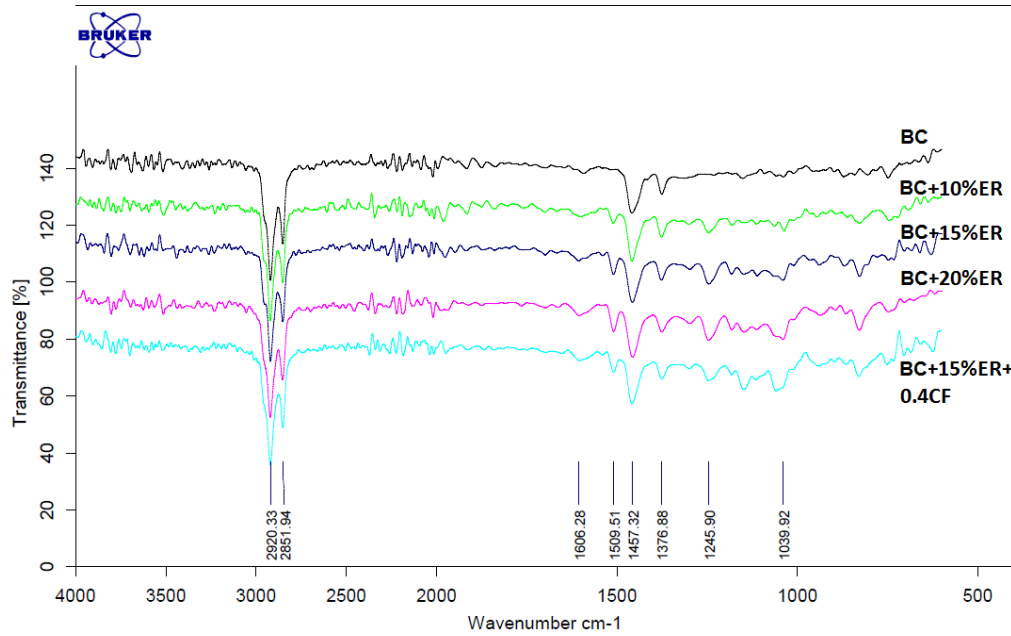
نشان‌دهنده هیدروکربن‌های آلیفاتیک قیر است. همچنین، اتصالات (C-H) در CH_2 و CH_3 توسط پیک‌های مشخص شده در نقاط $1457/32$ و $1376/88$ ظهور کرده‌اند. حال، در آنالیز طیف قیرهای اصلاح‌شده، طیف تقریباً مشابه قیر پایه است؛ اما در برخی نقاط به دلیل وجود گروه‌های عاملی رزین اپوکسی و هاردنر با آن تفاوت دارد. پیک‌های به‌وجود آمده در ناحیه $1509/51$ و $1606/28$ مربوط به جذب‌های کششی حلقه‌های آروماتیک رزین اپوکسی دی‌کلیسیدیل‌اتر بیس فنول A می‌باشد. پیک تغییر کرده در نقطه $1039/92$ مربوط به اتصالات (C-O) در رزین اپوکسی است. پیک تغییر کرده در نقطه $1245/9$ متعلق به اتصالات (C-N) در هاردنر آمینی است.

همانطور که در طیف نمونه‌های اصلاح‌شده مشاهده می‌شود، افزایش درصد ترکیب رزین اپوکسی سبب ایجاد پیک جدید نشده است و تنها پیک‌های بلندتر را به همراه داشته که این نیز نمایانگر ترکیب بیشتر گروه‌های عاملی مؤثر در قیر اصلاح‌شده می‌باشد. برآیند تحلیل نمودارها نشان‌دهنده تأثیرگذار بودن روش ترکیب رزین اپوکسی در ساختار شیمیایی قیر می‌باشد. از سوی دیگر، مشخص گردید که الیاف سرامیک نقشی در تغییر ساختار شیمیایی نداشته و صرفاً به واسطه تغییرات فیزیکی در مخلوط آسفالتی تأثیرگذار خواهد بود.

مدول برشی G^* معیاری از مقاومت قیر در برابر تغییر شکل تحت بارگذاری و زاویه فاز δ معیاری از تعادل ویسکوالاستیک قیر است. همان‌گونه که در شکل ۷ قابل مشاهده است، با افزایش درصد ترکیب رزین اپوکسی در قیر، مقدار مدول برشی افزایش و متناسب با آن مقدار زاویه فاز کاهش می‌یابد. میزان افزایش در مدول برشی برای نمونه حاوی ۲۰ درصد رزین اپوکسی معادل $1/7$ برابر است. افزایش مدول برشی به نوعی نشان‌دهنده ارتقاء ویسکوزیته قیر است. همچنین، کاهش زاویه فاز مبین بهبود پاسخ الاستیک در رئولوژی قیر می‌باشد. یافته‌های این بخش با مطالعات قبلی در زمینه قیر اصلاح‌شده با رزین اپوکسی همسو است (فوهاید و همکاران، ۲۰۱۸).

۴-۲. نتایج آزمون FT-IR

طیف حاصل از این آزمایش نشان‌دهنده تغییر یا عدم تغییر در ساختار مولکولی قیر اصلاح‌شده می‌باشد. در شکل ۸، نمودار طیف FT-IR برای قیر پایه و نمونه‌های قیر اصلاح‌شده با سه مقدار متفاوت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد رزین اپوکسی ارائه شده است. به‌علاوه، در شکل ۸، جهت بررسی اثر ممکن شیمیایی حاصل از ترکیب الیاف سرامیک با قیر و رزین اپوکسی، درصد وزنی متناسب الیاف سرامیک با نمونه قیر اصلاح‌شده ۱۵ درصد رزین اپوکسی ترکیب و مورد بررسی قرار گرفته است. پیک‌های مشخص شده در $2920/33$ و $2851/94$

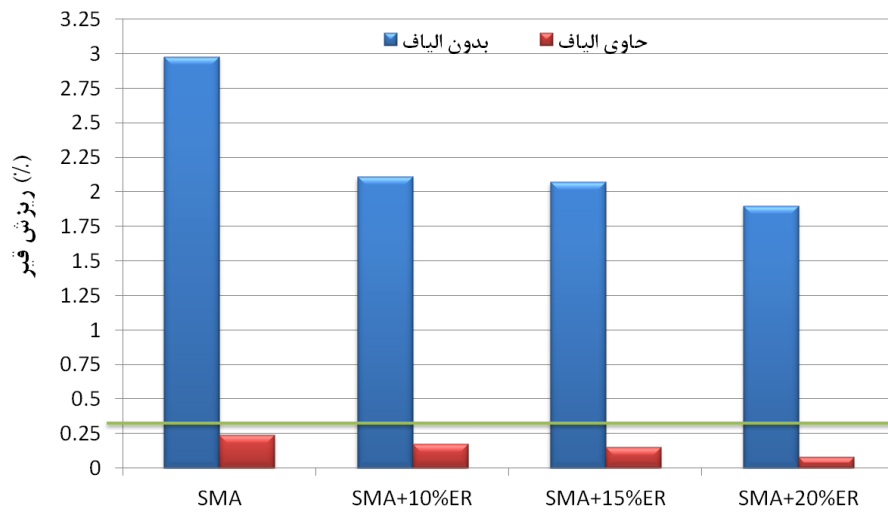


شکل ۸. طیف FT-IR قیر پایه و اصلاح شده

است. از سوی دیگر، نمونه‌های آسفالت SMA حاوی رزین اپوکسی اگرچه به تنهایی و بدون حضور الیاف قادر به جلوگیری از ریزش قیر بیش از حد استاندارد نبودند، اما عملکرد ریزش قیر بهتری از خود در قیاس با نمونه‌های پایه SMA بدون الیاف نشان دادند.

۴-۲. نتایج تست ریزش قیر

همانطور که در شکل ۹ به نمایش در آمده است، تأثیر افزودن الیاف سرامیک در کاهش میزان ریزش قیر بسیار چشمگیر می‌باشد و برای تمام نمونه‌ها کمتر از ۰/۳ درصد به دست آمده

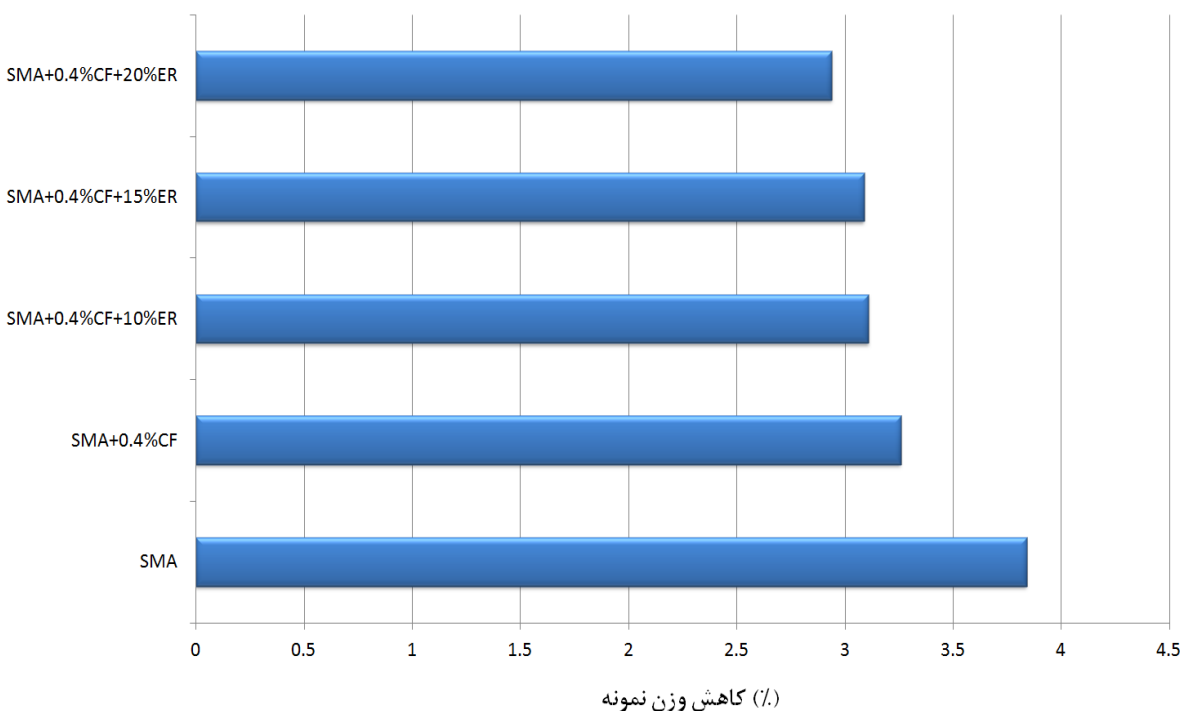


شکل ۹. نمودار میزان ریزش قیر در آسفالت‌های مورد مطالعه

۳-۴. نتایج تست کانتابرو

شکل ۱۰، خلاصه‌ای از نتایج آزمایش را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل قابل مشاهده است نمونه بدون الیاف بیشترین میزان کاهش وزن کانتابرو را داشته و بعد از آن نمونه حاوی الیاف و سپس نمونه‌های اصلاح‌شده با رزین اپوکسی و الیاف. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با افزودن الیاف سرامیک، انسجام و مقاومت سایشی SMA برای پذیرش ضربات افزایش یافته است. همچنین، مشاهده شد که در نمونه‌های SMA ساخته‌شده با قیر اصلاح‌شده درصد مواد از دست رفته نسبت به نمونه‌های معمولی کمتر می‌شود. این مورد می‌تواند نتیجه چسبندگی بهتر قیر اصلاح‌شده دارای ویسکوزیته بیشتر به سنگدانه‌ها باشد که با نتایج تحقیق انجام شده توسط کیان

و لو (۲۰۱۵) روی مقاومت ضربه‌ای نمونه‌های متخلخل حاوی رزین اپوکسی نیز هم‌راستا می‌باشد. با توجه به اختلاف ناچیز در میانگین خروجی تست انجام شده جهت ارزیابی وجود تفاوت معنی‌دار در عملکرد دوام نمونه‌های اصلاح‌شده در قیاس با نمونه شاهد، ارزیابی آماری آزمون t مستقل روی داده‌ها صورت گرفت. آزمون t به کمک نرم‌افزار SPSS انجام شد و در گام اول توزیع نرمال داده‌ها کنترل گردید. خروجی تحلیل آماری نمونه‌های اصلاح‌شده در قیاس با نمونه شاهد SMA در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول ۶ مشخص است، سطح معناداری (Sig) نتایج برای تمام نمونه‌ها کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد و این بدان معنا است که ترکیب الیاف و رزین اپوکسی توانسته مشخصاً اثر مثبت بر عملکرد دوام و عریان‌شوندگی در اثر ضربه به همراه داشته باشد.



شکل ۱۰. نمودار مقایسه پارامتر تست کانتابرو نمونه‌ها

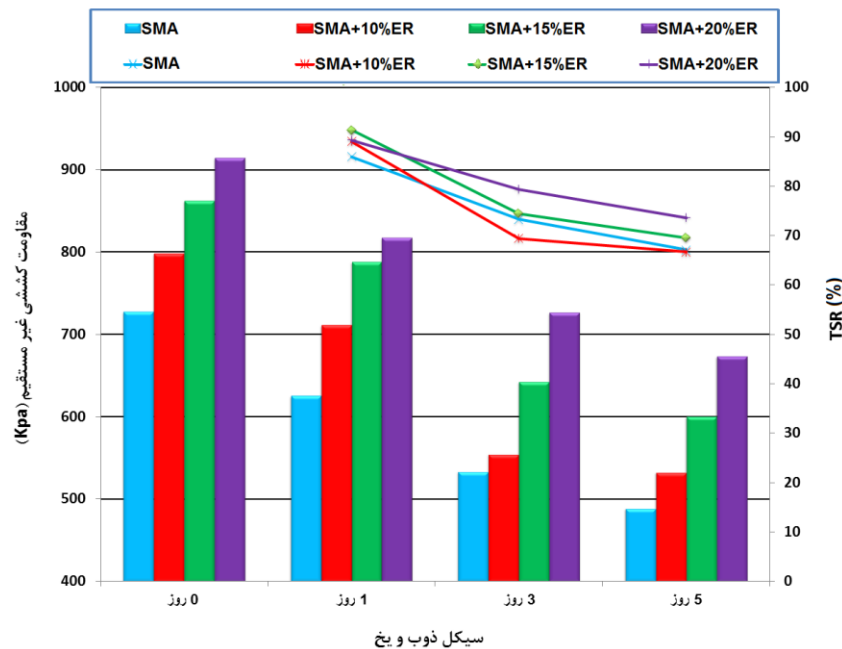
جدول ۶. خروجی آزمون t مستقل برای نتایج تست کانتابرو

نمونه	آزمون لوین برای برابری واریانس‌ها				آزمون t برای برابری میانگین‌ها				
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	اختلاف میانگین	انحراف استاندارد	فاصله اطمینان ۹۵٪ پایین	بالا
SMA+0.4%CF	1.104	0.353	3.421	4	0.027	0.59667	0.17439	0.11249	1.08084
SMA+0.4%CF+10%ER	2.796	0.170	3.421	3.018	0.041	0.59667	0.17439	0.04358	1.14975
			4.585	4	0.01	0.74333	0.16214	0.29316	1.19350
SMA+0.4%CF+15%ER	1.458	0.294	4.585	2.4	0.31	0.74333	0.16214	0.14060	1.34060
			4.476	4	0.011	0.76333	0.17055	0.28980	1.23687
SMA+0.4%CF+20%ER	0.009	0.93	4.476	2.833	0.023	0.76333	0.17055	0.20203	1.32464
			4.403	4	0.012	0.95667	0.21728	0.35340	1.55994
			4.403	3.999	0.012	0.95667	0.21728	0.35337	1.55997

تغییر در پارامتر TSR، کاهش شیب تخریب ناشی از رطوبت برای نمونه‌های حاوی رزین اپوکسی در بازه سیکل‌های ۳ تا ۵ در قیاس با نمونه‌های حاوی قیر پایه است. این مورد می‌تواند نشانگر پیش‌بینی عملکرد بلندمدت بهتر آسفالت‌های اصلاح‌شده SMA در برابر اثر چرخه‌های یخبندان و ذوب باشد. همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشخص است، نمونه حاوی ۲۰ درصد رزین اپوکسی بهترین TSR را پس از طی پنج چرخه ذوب و یخ به نمایش گذاشته است.

۴-۴. نتایج تست چرخه‌های ذوب و یخ

نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) نمونه‌های شرایط دیده‌شده و شرایط دیده‌نشده (صفر سیکل ذوب و یخ) در شکل ۱۱ ارائه شده است. مطابق انتظار، پارامتر ITS مخلوط‌های شرایط دیده‌شده کمتر از مخلوط‌های خشک است. حداقل مقدار نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) معادل ۸۰٪ برای سیکل اول ذوب و یخ در تمام نمونه‌ها رعایت گشته است. نکته قابل توجه در بررسی نرخ



شکل ۱۱. نمودار میزان مقاومت کششی غیرمستقیم و نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در سیکل‌های ذوب-یخ

مطالعات در قیاس با مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده پلیمری همسو می‌باشد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۴).

در جدول ۷، میزان معناداری تأثیر ترکیب درصدی مختلف رزین اپوکسی بر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های SMA حاوی الیاف تحت چرخه‌های متفاوت در قیاس با نمونه شاهد به ازای هر چرخه ذوب و یخ ارائه گشته است. مطابق مقادیر به دست آمده برای پارامتر سطح معناداری نمونه اصلاح‌شده با ۱۰ درصد رزین اپوکسی در سیکل‌های ۳ و ۵ روزه ذوب و یخ، این درصد افزودنی نتوانسته است تأثیر چشمگیری در ارتقاء مقاومت SMA به همراه داشته باشد. اما بهبود در نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های اصلاح‌شده ۱۵ و ۲۰ درصد رزین در تمامی چرخه‌ها قابل توجه بوده است.

مطابق شکل ۱۱، چرخه‌های ذوب و یخ با آسیب رساندن به خصوصیات ویسکوالاستیک ماستیک مخلوط آسفالتی SMA سبب ایجاد حفره‌های خالی و ترک بیشتر، در نتیجه کاهش مقاومت مکانیکی نمونه‌ها می‌شوند. در تحلیل رفتار نمونه‌های اصلاح‌شده باید بیان نمود که نقش ترکیب گروه‌های عاملی اپوکسی مناسب در قیر و بهبود خواص رئولوژی و شیمیایی جهت افزایش همبستگی بخش ماستیک و سنگدانه‌ها در آسفالت SMA غیر قابل انکار است. اتصالات عرضی مولکول‌ها در پلیمر ترموست رزین اپوکسی، شبکه‌ای سه‌بعدی در ساختار قیر اصلاح‌شده به وجود می‌آورد که این ساختار با ایجاد پیوندی قوی بین قیر و سنگدانه‌ها مانع از نفوذ رطوبت به لایه تماسی طی سیکل‌های متوالی ذوب و یخ می‌شود. یافته‌های این پژوهش مبنی بر مقاومت بیشتر مخلوط‌های رزین اپوکسی با نتایج گزارش شده سایر

جدول ۷. خروجی آزمون t مستقل برای نتایج مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌ها

نمونه	آزمون لوین برای برابری واریانس‌ها		آزمون t برای برابری میانگین‌ها							
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	اختلاف میانگین	انحراف استاندارد	فاصله اطمینان ۹۵٪ پایین	بالا	
0 روز	SMA+10%ER	0.261	0.645	-3.251	3	0.047	-70.83	21.789	-140.176	-1.490
				-3.358	2.517	0.057	-70.83	21.095	-145.881	4.214
				-6.971	3	0.006	-135.333	19.412	-197.113	-73.553
SMA+15%ER	2.696	0.199	-8.255	2.882	0.004	-135.333	16.394	-188.732	-81.933	
			-9.531	3	0.002	-187.333	19.654	-249.882	-124.784	
			-11.082	2.967	0.002	-187.333	16.904	-241.475	-133.191	
SMA+20%ER	2.224	0.233	-6.432	3	0.008	-85.666	13.319	-128.055	-43.248	
			-8.079	2.328	0.009	-85.666	10.603	-125.654	-45.679	
			-7.408	3	0.005	-162.166	21.89	-231.833	-92.499	
1 روز	SMA+10%ER	3.506	0.158	-6.333	1.385	0.055	-162.166	25.605	-335.408	11.075
				-11.114	3	0.002	-191.666	17.245	-246.549	-136.783
				-10.576	1.927	0.01	-191.666	18.123	-272.535	-110.797
SMA+15%ER	3.702	0.15	-1.578	3	0.213	-21.833	13.836	-65.865	22.199	
			-1.927	2.635	0.162	-21.833	11.329	60.89	17.224	
			-7.286	3	0.005	-109.333	15.006	-157.089	-61.577	
SMA+20%ER	1.038	0.383	-7.950	2.883	0.005	-109.333	13.751	-154.12	-64.546	
			-11.067	3	0.002	-193.333	17.469	-248.929	-137.733	
			-10.593	1.965	0.009	-193.333	18.251	-273.217	-113.449	
3 روز	SMA+10%ER	3.913	0.142	-3.072	3	0.054	-43.833	14.27	-89.249	1.582
				-3.358	2.893	0.046	-43.833	13.052	-85.256	-1.410
				-7.329	3	0.005	-112.833	15.394	-161.825	-63.841
SMA+15%ER	0.013	0.915	-7.434	2.379	0.011	-112.833	15.177	-169.108	-56.558	
			-13.59	3	0.001	-185.833	13.674	-229.351	-142.315	
			-15.686	2.986	0.001	-185.833	11.847	-223.637	-148.029	
SMA+20%ER	0.839	0.427								

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش، با توجه به مرور مطالعات پیشین، تأثیر اصلاح پلیمری قیر به وسیله پلیمر ترموست رزین اپوکسی و ترکیب الیاف معدنی سرامیک در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا، تست‌های قیر و FTIR در کنار سه تست ریزش قیر، کاهش وزنی کانتابرو و مقاومت در برابر آسیب رطوبتی سیکل‌های ذوب و یخ روی نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده انجام پذیرفت. با توجه به تحلیل نتایج به‌دست آمده، برخی از یافته‌های قابل ارائه عبارتند از:

- رزین اپوکسی، خصوصیات رئولوژی قیر را در راستای بهبود عملکرد ویسکوالاستیک تغییر داده است. با افزایش درصد رزین اپوکسی، مقدار مدول برشی قیر افزون می‌گردد. - نتایج تست FTIR تغییر خصوصیات شیمیایی قیر را تحت اثر ترکیب رزین اپوکسی نشان داده، ولی افزودن الیاف سرامیک تأثیری در این زمینه به همراه نداشته است.

- به‌کارگیری و افزایش درصد ترکیب رزین اپوکسی در قیر اصلاح‌شده سبب کاهش میزان ریزش قیر در نمونه‌های آسفالت SMA می‌گردد. این مقدار کاهش در نمونه‌های آسفالت بدون الیاف به‌طور میانگین ۳۳ درصد می‌باشد. از این‌رو، همچنان نیاز به بهره‌گیری همزمان از الیاف در ساخت نمونه‌ها مشهود می‌باشد.

- ترکیب الیاف سرامیک به اندازه ۰/۴ درصد وزنی مخلوط SMA در نمونه‌های حاوی قیر پایه توانسته ریزش قیر را تا حد مجاز خود کنترل نماید. همچنین، اثر این الیاف بر انسجام ماستیک و اصلاح میزان کاهش وزن در تست کانتابرو کاملاً معنی‌دار بوده است.

- رزین اپوکسی در افزایش دوام نمونه‌های SMA در تست کانتابرو مؤثر بوده، اما این مقدار افزایش نسبت به میزان تأثیر الیاف سرامیک ملموس نبوده است.

- نتایج حاصل از آزمایش AASHTO T283 نشان‌دهنده افزایش مقاومت رطوبتی متناسب با درصد به‌کارگیری رزین اپوکسی در آسفالت SMA می‌باشد. مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی مرطوب حاوی ۱۰ درصد رزین اپوکسی نسبت به مخلوط بدون رزین اپوکسی ۱۴٪ افزایش یافته است و با افزایش رزین اپوکسی به ۲۰ درصد این مقدار به ۳۰٪ ارتقا می‌یابد.

- تحلیل مقادیر نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها به ازای سه سیکل ۱، ۳ و ۵ روزه نشانگر کاهش شیب خط نزولی نرخ خرابی و عملکرد بهتر نمونه‌های اصلاح‌شده با رزین اپوکسی در برابر شرایط ذوب و یخ، به‌ویژه در سیکل‌های بالاتر، است.

- با توجه به نتایج تست‌های عملکردی و حدود تغییرات در مقادیر به‌دست آمده برای پارامترهای رئولوژیک قیر اصلاح‌شده، میزان ۲۰ درصد اصلاح‌کننده رزین اپوکسی در قیر به عنوان درصد مناسب معرفی می‌گردد.

۶. مراجع

- Apostolidis, P., Liu, X., Kasbergen, C., Van de Ven, M., Pipintakos, G. and Scarpas, A. 2018. "Chemo-rheological study of hardening of epoxy modified bituminous binders with the finite element method". *Transport. Res. Record*, 2672(28): 190-199.
- Arabani, M. and Shabani, A. 2019. "Evaluation of the ceramic fiber modified asphalt binder". *Constr. Build. Mater.*, 205: 377-386.
- Bahmani, H., Khani Sanij, H., Roshani, R., Majidi Shad, M., Hosseini, S., Edalati, M., . . . Almasi, S. 2022. "Influence of mixing conditions of modified bitumen on moisture sensitivity of asphalt compounds". *Int. J. Eng.*, 35(5): 855-864.
- Behnood, A. and Olek, J. 2017. "Rheological properties of asphalt binders modified with styrene-butadiene-styrene (SBS), ground tire rubber (GTR), or polyphosphoric acid (PPA)". *Constr. Build. Mater.*, 151: 464-478.

- Blazejowski, K. 2016. "Stone matrix asphalt: Theory and practice". CRC Press.
- Cheng, Y., Wang, W., Gong, Y., Wang, S., Yang, S. and Sun, X. 2018. "Comparative study on the damage characteristics of asphalt mixtures reinforced with an eco-friendly basalt fiber under freeze-thaw cycles". *Mater.*, 11(12): 2488.
- Cong, L., Ren, M., Shi, J., Yang, F. and Guo, G. 2020. "Experimental investigation on performance deterioration of asphalt mixture under freeze-thaw cycles". *Int. J. Transport. Sci. Tech.*, 9(3): 218-228.
- Cox, B. C., Smith, B. T., Howard, I. L. and James, R. S. 2017. "State of knowledge for Cantabro testing of dense graded asphalt". *J. Mater. Civ. Eng.*, 29(10): 04017174.
- Dong, Z. and Li, L. P. 2015. "Study on dynamic mechanical properties and microstructure of epoxy asphalt". In: 2015 International Conference on Applied Science and Engineering Innovation (pp. 516-523), Atlantis Press.
- Fuhaid, A. A., Lu, Q. and Luo, S. 2018. "Laboratory evaluation of biobased epoxy asphalt binder for asphalt pavement". *J. Mater. Civ. Eng.*, 30(7): 06018007.
- Herrington, P. R. 2009. "Epoxy-modified porous asphalt". New Zealand Transport Agency.
- Karimi, M. M., Dehaghi, E. A. and Behnood, A. 2021. "A fracture-based approach to characterize long-term performance of asphalt mixes under moisture and freeze-thaw conditions". *Eng. Fracture Mech.*, 241: 107418.
- Luo, S., Lu, Q., Qian, Z., Wang, H. and Huang, Y. 2017. "Laboratory investigation and numerical simulation of the rutting performance of double-layer surfacing structure for steel bridge decks". *Constr. Build. Mater.*, 144: 178-187.
- Majidi Shad, M. M., Khabiri, M. M., Arabani, M. and Bahmani, H. 2022. "3D finite element model for recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement rutting simulation". *Int. J. Eng.*, 35(7): 1428-1439.
- Naseri Yalghouzaghaj, M., Sarkar, A., Hamed, G. H. and Hayati, P. 2020. "Effect of ceramic fibers on the thermal cracking of hot-mix asphalt". *J. Mater. Civ. Eng.*, 32(11): 04020325 .
- Qian, Z. and Lu, Q. 2015. "Design and laboratory evaluation of small particle porous epoxy asphalt surface mixture for roadway pavements". *Constr. Build. Mater.*, 77: 110-116.
- Özgan, E. and Serin, S. 2013. "Investigation of certain engineering characteristics of asphalt concrete exposed to freeze-thaw cycles". *Cold Reg. Sci. Tech.*, 85: 131-136.
- Sol-Sánchez, M., Moreno-Navarro, F., García-Travé, G. and Rubio-Gámez, M. C. 2015. "Laboratory study of the long-term climatic deterioration of asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 88: 32-40.
- Wang, X., Wu, R. and Zhang, L. 2019. "Development and performance evaluation of epoxy asphalt concrete modified with glass fibre". *Road Mater. Pavement Design*, 20(3): 715-726.
- Wang, X., Ma, B., Chen, S., Wei, K. and Kang, X. 2021. "Properties of epoxy-resin binders and feasibility of their application in pavement mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 295: 123531.
- Wu, J. P., Herrington, P. R. and Alabaster, D. 2019. "Long-term durability of epoxy-modified open-graded porous asphalt wearing course". *Int. J. Pavement Eng.*, 20(8): 920-927.
- Xiang, Q. and Xiao, F. 2020. "Applications of epoxy materials in pavement engineering". *Constr. Build. Mater.*, 235: 117529.
- Xu, W., Zhuang, G., Chen, Z. and Wei, J. 2020. "Experimental study on the micromorphology and strength formation mechanism of epoxy asphalt during the curing reaction". *Appl. Sci.*, 10(7): 2610.
- Yan, K., Ge, D., You, L. and Wang, X. 2015. "Laboratory investigation of the characteristics of SMA mixtures under freeze-thaw cycles". *Cold Reg. Sci. Tech.*, 119: 68-74.
- Yarahmadi, A. M., Shafabakhsh, G. and Asakereh, A. 2022. "Laboratory investigation of the effect of nano CaCO₃ on rutting and fatigue of stone mastic asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 317: 126127.
- Yu, J., Cong, P., & Wu, S. (2009). Laboratory investigation of the properties of asphalt modified with epoxy resin. *Journal of Applied Polymer Science*, 113(6), 3557-3563 .
- Yin, H., Zhang, Y., Sun, Y., Xu, W., Yu, D., Xie, H. and Cheng, R. 2015. "Performance of hot mix epoxy asphalt binder and its concrete". *Mater. Struct.*, 48: 3825-3835.
- Zhu, C. 2013. "Japan TAF epoxy asphalt concrete design and steel bridge deck pavement construction technology". *Appl. Mech. Mater.*, 330: 905-910.
- Zhu, J., Birgisson, B. and Kringos, N. 2014. "Polymer modification of bitumen: Advances and challenges". *Eur. Polym. J.*, 54: 18-38.
- Zhang, Z., Sun, J., Huang, Z., Wang, F., Jia, M., Lv, W. and Ye, J. 2021. "A laboratory study of epoxy/polyurethane modified asphalt binders and mixtures suitable for flexible bridge deck pavement". *Constr. Build. Mater.*, 274: 122084.